

Blitzschlagbrände und Sommertrockenheit: Gibt es einen Zusammenhang?

Jose Vazquez Moris Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL (CH)
Marco Conedera Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL (CH)
Luca Nisi Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz (CH)
Gianni Boris Pezzatti Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL (CH)*

Blitzschlagbrände und Sommertrockenheit: Gibt es einen Zusammenhang?

Blitzschläge sind weltweit die wichtigste natürliche Ursache für Waldbrände. In der Schweiz machen die Blitzschlagbrände im Schnitt rund einen Drittel (30.5%) der im Hochsommer (Juni, Juli und August) vorkommenden Brandereignisse aus. In diesem Beitrag analysieren wir das Auftreten und die herrschenden meteorologischen Bedingungen, welche die 275 in der Waldbranddatenbank «Swissfire» für die Periode 2000–2018 registrierten Blitzschlagbrände charakterisieren. In der Schweiz sind Blitzschlagbrände fast ausschliesslich in gebirgigen Lagen zu verzeichnen, wobei ihre Häufigkeit von den Südalpen über die Zentralalpen bis zu den Nordalpen abnimmt. Am meisten betroffen von Blitzschlagbränden sind Nadelbäume, vor allem die Fichte und die Lärche. Anhaltende Sommertrockenheit ist bei Weitem der wichtigste Auslöser für Blitzschlagbrände. Unsere Resultate zeigen, dass sich die Gefahr von Blitzschlagbränden im Schweizer Alpenraum deutlich erhöht und auch der Jura und das Mittelland von Blitzschlagbränden betroffen sein können, wenn sich, wie im Zusammenhang mit dem Klimawandel prognostiziert, wärmere Sommer mit lange andauernden Trockenperioden häufen. Noch im Detail abzuklären sind die genauen meteorologischen Bedingungen, die Blitzschlagbrände begünstigen.

Keywords: lightning-caused fires, summer drought, climate change, Switzerland, Alps
doi: 10.3188/szf.2020.0281

* Campus di Ricerca, A Ramél 18, CH-6593 Cadenazzo, E-Mail boris.pezzatti@wsl.ch

Blitzschläge sind weltweit die wichtigste natürliche Ursache von Waldbränden. Sie stellen in vielen Waldökosystemen den Haupttreiber der Bestandesdynamik und -sukzession dar (Pyne et al 1996, Scott et al 2004). In den borealen Wäldern Nordamerikas zum Beispiel geht die Mehrheit der Brände und der abgebrannten Fläche auf Blitzschläge zurück (Stocks et al 2003, Veraverbeke et al 2017). In Europa ist der Anteil der durch Blitzschläge verursachten Waldbrände wegen des stärkeren menschlichen Einflusses kleiner. Im stark brandgefährdeten Mittelmeergebiet machen blitzinduzierte Brände maximal 5% der Gesamtzahl der Waldbrände aus (Vázquez & Moreno 1998, Ganteaume et al 2013, Martínez et al 2009). In den borealen Wäldern Nordeuropas beläuft sich ihr Anteil auf etwa 10% (Schweden: 8%, Granström 1993; Finnland: 13%, Larjavaara et al 2005a). In der Schweiz betrug der Anteil der Blitzschlagbrände in der Periode 2000 bis 2018 im Jahresdurchschnitt 12.3%, im Hochsommer (Juni, Juli und August) aber 30.5%¹, was durchaus mit an-

deren alpinen Gebieten vergleichbar ist (Cesti et al 2005, Müller et al 2013, Vacchiano et al 2018).

Blitzschlagbrände und vom Menschen verursachte Waldbrände unterscheiden sich in den Alpen in verschiedener Hinsicht. Anthropogene Brände sind vor allem im Frühling vor dem Beginn der Vegetationsperiode am häufigsten (März bis April), wohingegen Blitzschlagbrände hauptsächlich im Hochsommer auftreten (vereinzelt wurden Blitzschlagbrände aber auch schon im Mai, im September und – ganz selten – im Oktober registriert; Cesti et al 2005). Blitzschlagbrände betreffen mehrheitlich Nadelwälder in steileren und höheren Lagen (Conedera et al 2006, Müller & Vacik 2017). Diese Brände entfachen meistens als unterirdische Schwelfeuer im Rohhumus, wobei die Verweilphase (die sogenannte Holdover-Zeit; Wottom & Martel 2005) eine bis zwei Wochen betragen kann, bevor das Feuer in die sichtbare, oberirdische Verbrennungsphase

¹ www.wsl.ch/swissfire (23.4.2020)

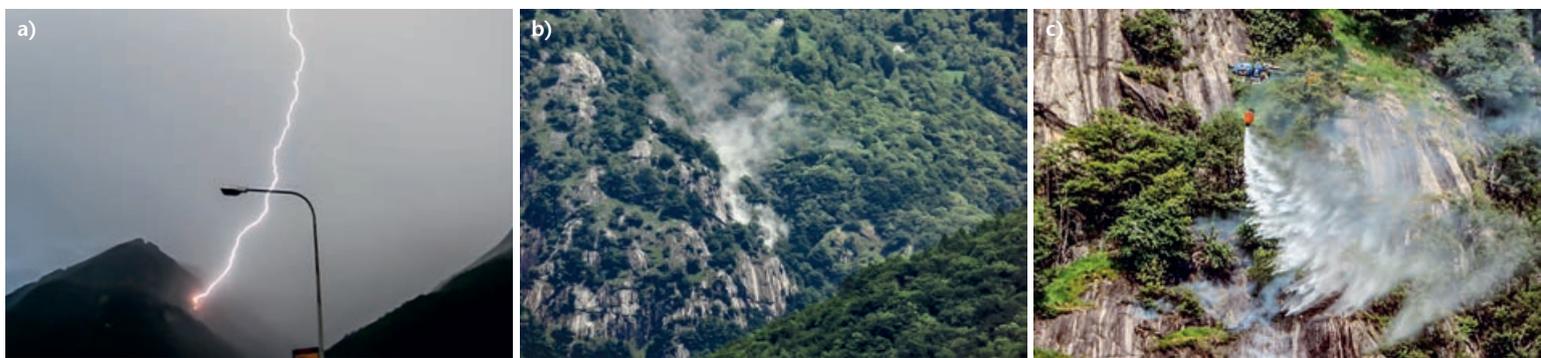


Abb 1 Entstehung eines Blitzschlagbrandes im Gebirge. a) Brandauslösender Blitzschlag am 19. Juli 2013 in Valle d'Arbedo (Tessin); b) Brandausbruch am 20. Juli 2013 auf einer mit Laubbäumen bestockten, unzugänglichen Felsnase; c) Löschaktion mit Helikopter. Fotos: Franjo Martinovic

übergeht (Conedera et al 2006). Aufgrund ihrer Eigenschaften – unterirdische Feuerherde in abgelegenen und steilen Gebieten – ist das Löschen von Blitzschlagbränden für die Feuerwehren eine Herausforderung (Cesti et al 2005; Abbildung 1).

Das Auftreten von durch Blitzschlag verursachten Waldbränden steht in engem Zusammenhang mit der vorhandenen Vegetation (z.B. Nadelholzanteil), der daraus entstehenden toten Biomasse (z.B. kompakte und entzündliche Streuschicht), den topografischen Bedingungen (z.B. blitzanziehende Kuppenlagen) und insbesondere den herrschenden meteorologischen Verhältnissen (Dürreperioden bzw. fehlende Niederschläge, gefolgt von Gewittern mit Blitzeinschlägen am Boden). Die aufgeführten meteorologischen Bedingungen können sowohl das Brandgut entzündbar machen als auch die Zünd-

energie liefern (Anderson 2002, Cesti et al 2005, Reineking et al 2010). Die Annahme liegt deshalb nahe, dass im Zuge des globalen Wandels und der Klimaveränderung trockenheitsinduzierte Blitzschlagbrände in Zukunft zunehmen (Conedera et al 2006, Flannigan & van Wagner 1991, Veraverbeke et al 2017).

In diesem Beitrag analysieren wir das gegenwärtige, durch Blitzschlag verursachte Waldbrandgeschehen in der Schweiz mit besonderem Augenmerk auf den Einfluss der Sommertrockenheit. Folgende Aspekte der Blitzschlagbrände werden dabei näher untersucht:

- ihre geografische und saisonale Verteilung,
- ihre jährliche Variabilität und ihr Zusammenhang mit meteorologischen Parametern,
- der Einfluss der Sommertrockenheit auf ihre Häufigkeit (Anzahl) und Ausdehnung (Fläche).

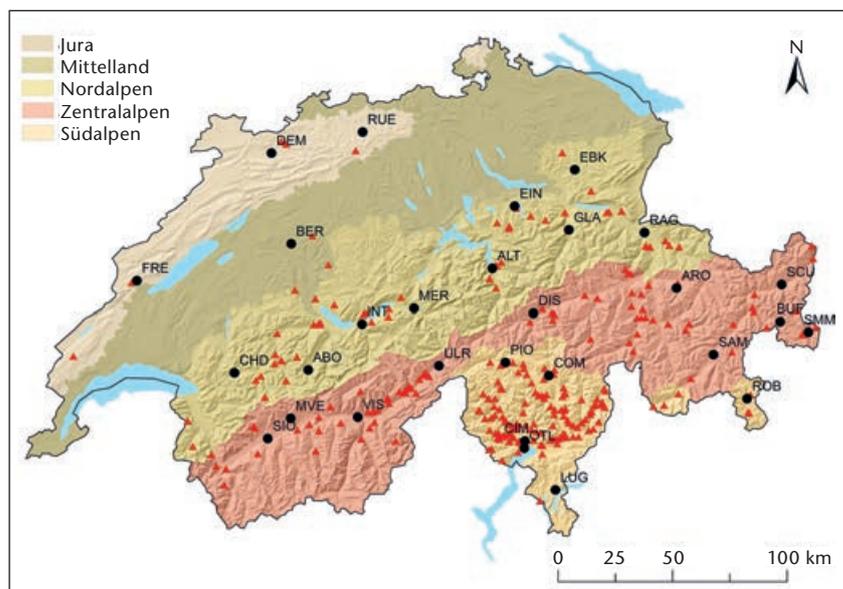


Abb 2 Lage der verwendeten meteorologischen Stationen und der registrierten Blitzschlagbrände für die Periode 2000–2018. Rote Dreiecke: Ausbruchsorte der Blitzschlagbrände; schwarze Punkte: meteorologische Stationen von MeteoSchweiz (ABO: Adelboden, ALT: Altdorf, ARO: Arosa, BER: Bern/Zollikofen, BUF: Buffalora, CHD: Château-d'Oex, CIM: Cimetta, COM: Acquarossa/Comprovasco, DEL: Delémont, DIS: Disentis, EBK: Ebnat-Kappel, EIN: Einsiedeln, FRE: Bullet/La Frétaz, GLA: Glarus, INT: Interlaken, LUG: Lugano, MER: Meiringen, MVE: Montana, OTL: Locarno/Monti, PIO: Piotta, RAG: Bad Ragaz, ROB: Poschiavo/Robbia, RUE: Rünenberg, SAM: Samedan, SCU: Scuol, SIO: Sion, SMM: Sta. Maria, Val Müstair, VIS: Visp, ULR: Ulrichen).

Methoden

Datenquellen

In die Untersuchung wurden alle in der Waldbranddatenbank «Swissfire» (Pezzatti et al 2019) verzeichneten Brände zwischen 2000 und 2018 einbezogen, die durch einen Blitzschlag verursacht worden waren (Abbildung 2).

Die Aufzeichnung von Blitzen in der ganzen Schweiz für den gleichen Zeitraum stammt aus dem Netzwerk «European Cooperation for Lightning Detection» (EUCLID)². Für die Studie wurden nur diejenigen Blitze berücksichtigt, die den Boden erreichten (sogenannte cloud-to-ground strokes, Erdblitze). Ihr Einschlagsort kann mittlerweile auf etwa 100 m genau bestimmt werden (Schulz et al 2016).

Die meteorologischen Daten stammen von Messstationen von MeteoSchweiz, die aufgrund ihrer Lage (biogeografische Regionen nach Gonseth et al 2001), der Blitzschlagaktivität in der Umgebung (Lage und Höhenbereich mit den meisten Blitzschlagbränden in der entsprechenden Region) und

² www.euclid.org (23.4.2020)

der Datenverfügbarkeit für den Untersuchungszeitraum (2000–2018) ausgewählt wurden. Insgesamt handelt es sich um 29 Stationen: 6 für die Südalpen, 10 für die Zentralalpen, 9 für die Nordalpen, 1 für das Mittelland und 3 für den Jura (Abbildung 2). Von diesen Stationen wurden sowohl tägliche (maximale, minimale und mittlere Temperatur, Niederschlag, mittlere relative Luftfeuchtigkeit, mittlere Windgeschwindigkeit und Schneehöhe) als auch monatliche (Niederschläge und Mitteltemperatur) meteorologische Parameter benutzt.

Datenvorbereitung

Für die beschreibende Statistik wurden die Daten zu den Blitzschlagbränden zuerst separat für jede biogeografische Region für jeden Monat und jedes Jahr berechnet. Da in den Jahren 2000 bis 2018 die meisten Blitzschlagbrände (94.5%) im Hochsommer (Juni, Juli und August) auftraten, wurden für die weiterführende Statistik nur noch die Daten dieser drei Sommermonate berücksichtigt.

Die täglichen meteorologischen Daten wurden als Input für den Fire Weather Indices Calculator³ der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) verwendet, um neun gängige Waldbrandwetterindizes sowie das Dampfdruckdefizit in täglicher Auflösung zu berechnen (De Angelis et al 2015). Die monatlichen Daten hin-

gegen dienten dazu, mit dem R-Paket SPEI⁴ die Dürreindizes Standardized Precipitation Index (SPI) und Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI; Vicente-Serrano et al 2010) für jede Station in monatlicher Auflösung zu ermitteln. Der SPI wird ausschliesslich anhand von Niederschlagsdaten berechnet, während der SPEI sowohl Niederschlag als auch Evapotranspiration berücksichtigt. Die Evapotranspiration wurde mit der Gleichung von Thornthwaite (1948) ermittelt, um daraus den Wasserhaushalt (Niederschlag – Evapotranspiration) abzuleiten. Für die Höchsttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit wurde für jede meteorologische Station und jedes Jahr aus den täglichen meteorologischen Daten von Juni, Juli und August der Mittelwert gerechnet. Für die Niederschläge wurden die Werte hingegen aufsummiert. Alle berechneten Werte der Meteorostationen wurden dann für die jeweiligen Regionen und den gesamten Schweizer Alpenraum (25 Stationen) gemittelt.

Datenanalyse

Für eine weiterführende statistische Analyse mittels Regressionen wurden nur die biogeografischen Regionen mit einer Mindestanzahl von 30 Blitzschlagbränden für die ganze Studienperiode berücksichtigt. Einbezogen werden konnten so nur die Regionen Süd-, Zentral- und Nordalpen, was etwa dem Schweizer Alpenraum entspricht. Die in diesen Regionen registrierten Blitzschlagbrände wurden mittels Regressionsmodellen mit einzelnen meteorologischen Variablen oder mit Waldbrandwetterindizes pro Region sowie für die gesamten Schweizer Alpen korreliert. Die Anzahl Blitzschlagbrände wurde mittels generalisierter linearer Modelle (Generalized Linear Models, GLM) mit einer Poisson-Verteilung analysiert. Die log₁₀-transformierte Brandfläche wurde dagegen mittels linearer Regressionsmodelle mit den meteorologischen Erklärungsvariablen korreliert. Die Modellleistung wurde mit dem R² für die linearen Modelle und mit dem auf der Varianzfunktion basierenden R² für die Poisson-Regression (Zhang 2017) geprüft.

Resultate

Insgesamt sind in der Waldbranddatenbank Swissfire 275 durch Blitzschlag verursachte Brandereignisse für die Periode 2000–2018 registriert. In höchster Anzahl und Dichte traten die Blitzschlagbrände in den Südalpen (Sopraceneri und Misox) auf, gefolgt von den Zentralalpen und den Nordalpen (Abbildungen 2 und 3). In den Zentralalpen ist dabei eine gewisse Häufung im Oberwallis (Goms) und

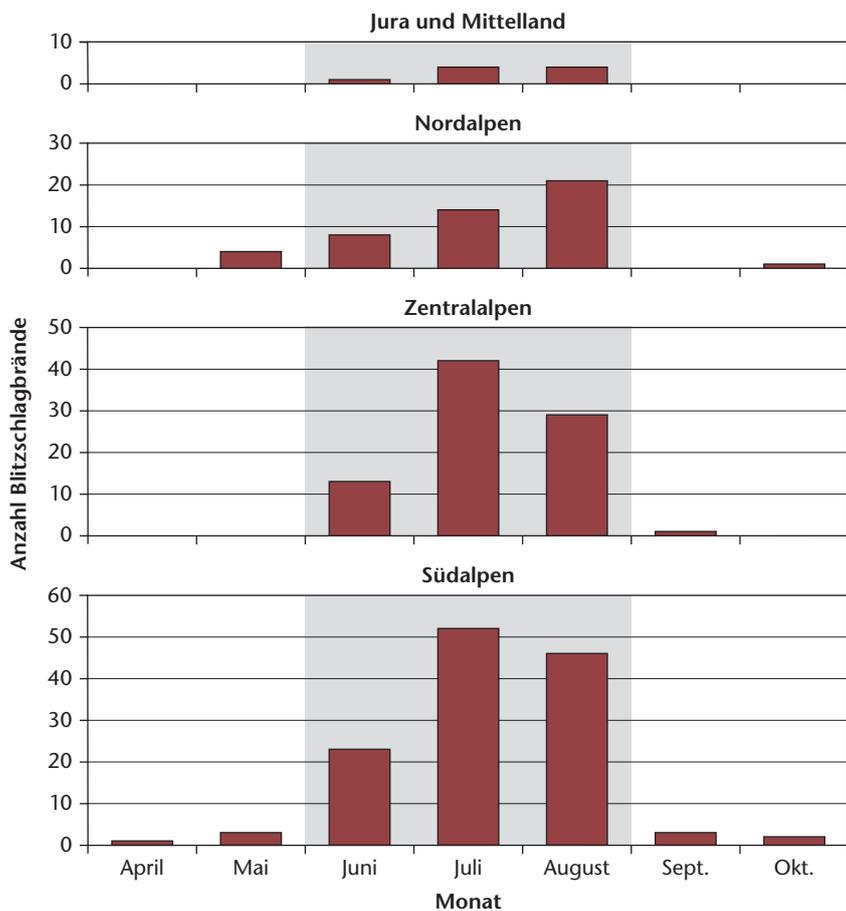


Abb 3 Monatliche Verteilung der Blitzschlagbrände in den biogeografischen Regionen der Schweiz in den Jahren 2000 bis 2018. Grau hinterlegt: Hochsommer.

3 <https://github.com/Insubric/fire-calculator> (23.4.2020)

4 <https://CRAN.R-project.org/package=SPEI> (23.4.2020)

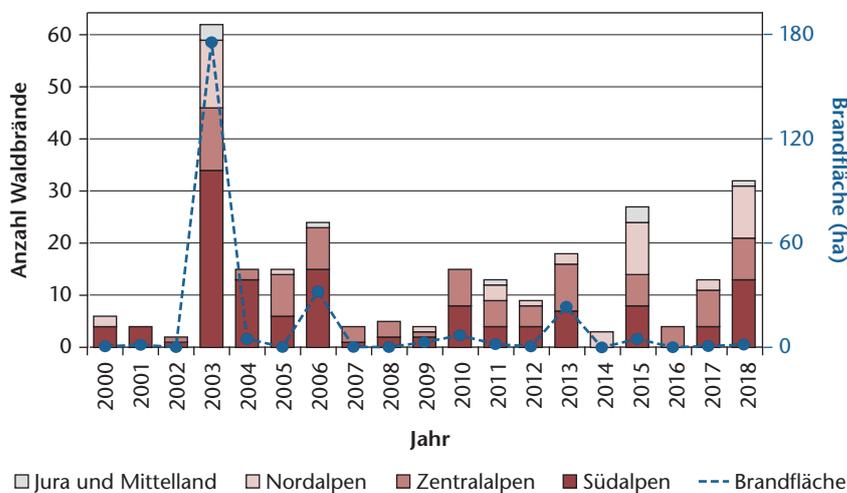


Abb 4 Anzahl Blitzschlagbrände (Säulen, linke Achse; nach biogeografischer Region) und daraus resultierende Brandfläche (Linie; rechte Achse) in den Jahren 2000 bis 2018.

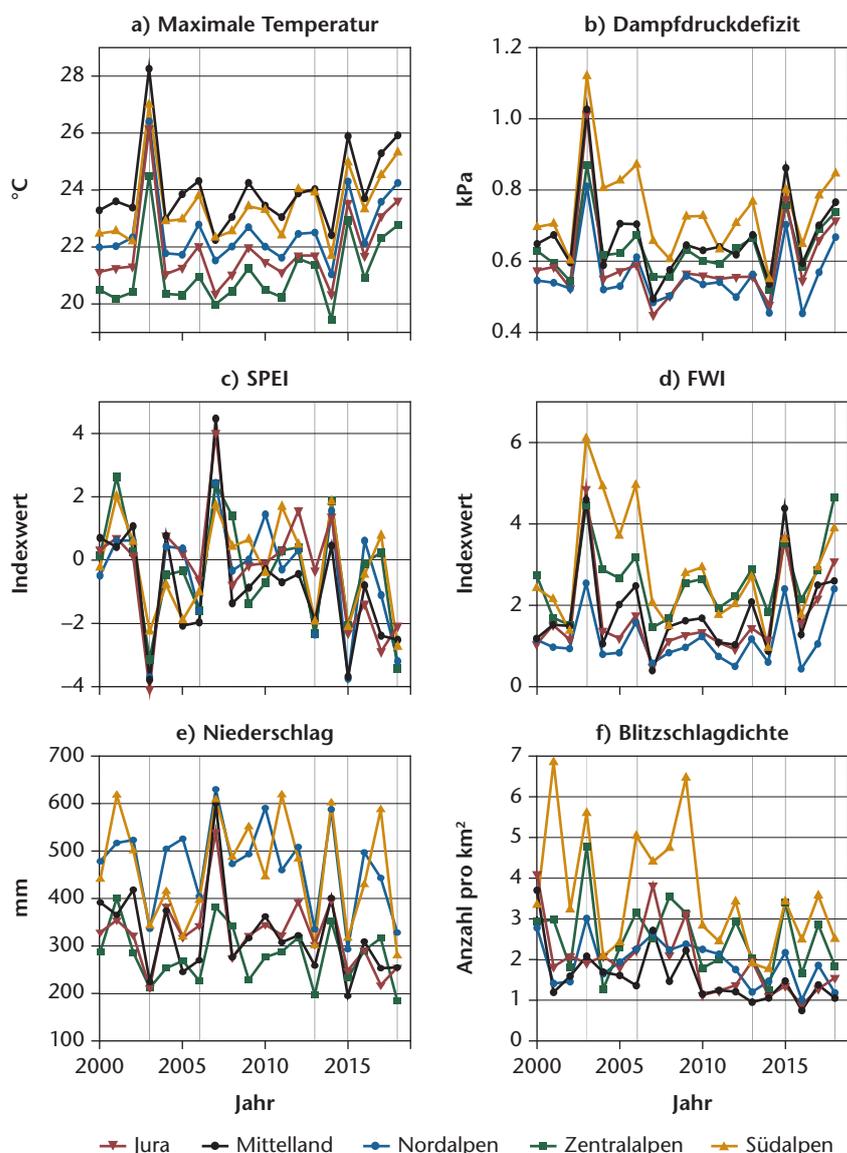


Abb 5 Ausgewählte Meteoparameter und abgeleitete Indizes im Hochsommer (Juni, Juli, August) der Jahre 2000 bis 2018 in den biogeografischen Regionen. a) mittlere maximale Temperatur, b) Dampfdruckdefizit, c) SPEI-1 Monat (monatlicher Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index), d) mittlerer FWI (Canadian Fire Weather Index), e) Gesamtniederschlag und f) Blitzschlagdichte. Die Angaben widerspiegeln den Mittelwert der pro Region genutzten Wetterstationen. In den Abbildungen sind die Blitzschlagbrandjahre 2003, 2006, 2013, 2015 und 2018 mit vertikalen Strichen markiert.

im Bündner Rheintal um Thusis feststellbar. Ganz selten traten Blitzschlagbrände im Jura und im Mittelland auf. Zwischen den Regionen existieren zudem kleine Unterschiede in der Verteilung der Blitzschlagbrände innerhalb des Hochsommers. Während in den Süd- und den Zentralalpen die Häufigkeit von Blitzschlagbränden vom Juni zum Juli sprunghaft anstieg, war das in den restlichen Regionen nicht der Fall (Abbildung 3).

Bei 170 der 275 Brände (61%) ist der Mischungsgrad des Waldbestands bekannt. Mit einem Anteil von 77% waren reine Nadelwälder mit Abstand am häufigsten von Blitzschlagbränden betroffen. In Mischbeständen waren 7% und in reinen Laubwäldern 16% der Brände zu verzeichnen. Bei den Nadelbäumen waren hauptsächlich die Fichte und die Lärche, bei den Laubbäumen vor allem die Buche und die Edelkastanie betroffen.

Das Auftreten von Blitzschlagbränden variiert von Jahr zu Jahr stark (Abbildung 4). Einige Jahre stechen sowohl durch die Anzahl als auch durch die Fläche der Brände hervor (2003, 2006), andere nur hinsichtlich der Anzahl (2015, 2018) oder der Fläche (2013). In einigen dieser Jahre gab es auch im Mittelland (2003, 2015, 2018) und/oder im Jura (2003, 2006, 2015) Blitzschlagbrände.

In all diesen Blitzschlagbrandjahren fielen im Hochsommer (Juni, Juli und August) gewisse meteorologische Parameter auf, die direkt oder indirekt mit Trockenheit verbunden sind. Diese Parameter sind die durchschnittliche maximale Temperatur (Abbildung 5a) und das mittlere Dampfdruckdefizit (Abbildung 5b), die beide in diesen Jahren stark erhöht waren. Auch die beiden Trockenheitsindizes SPEI und FWI (Canadian Fire Weather Index) schlugen deutlich aus (Abbildungen 5c und 5d). Weniger klar war die Beziehung zum Gesamtniederschlag, auch wenn dieser in den Blitzschlagbrandjahren eher tief war (Abbildung 5e). Kein direkter Zusammenhang zeigte sich mit der Blitzschlagdichte: Diese war in gewissen Blitzschlagbrandjahren hoch (z.B. 2003), in anderen dagegen niedrig (z.B. 2013; Abbildung 5f). Die Daten über die Blitzschlagdichte in Abbildung 5f müssen zudem mit Vorsicht genossen werden, da die Unterscheidung der Blitztypen (Erdblitze oder Wolkenblitze) seit 2011 dank der Inbetriebnahme zusätzlicher Messantennen eindeutig verbessert worden ist. Dies könnte zum Beispiel die seit 2011 generell tiefere Blitzschlagdichte auf der Alpensüdseite begründen.

Der Zusammenhang zwischen der Sommer-trockenheit und dem durch Blitzschläge verursachten Waldbrandgeschehen wird erst richtig deutlich, wenn man ausgewählte meteorologische Größen mit der Anzahl Brände oder mit der Brandfläche der jeweiligen Jahre in den verschiedenen Alpenregionen (Nord-, Zentral- und Südalpen; Tabelle 1) oder im ganzen Alpenraum (Tabelle 1, Abbildung 6) kor-

Erklärende Variable	Anzahl Waldbrände				Brandfläche			
	Nordalpen	Zentralalpen	Südalpen	Alpenraum	Nordalpen	Zentralalpen	Südalpen	Alpenraum
Anzahl Blitzschläge	0.07	0.12	0.04	0.19	0.12	0.05	0.07	0.18
Meteoparameter bzw. Trockenheitsindex								
Maximale Temperatur	0.65	0.44	0.76	0.83	0.32	0.32	0.38	0.40
Relative Luftfeuchtigkeit	0.76	0.44	0.82	0.89	0.35	0.17	0.51	0.68
Dampfdruckdefizit	0.69	0.48	0.86	0.87	0.34	0.31	0.56	0.63
Gesamtniederschlag	0.66	0.40	0.27	0.54	0.20	0.29	0.19	0.40
SPI 1-Monat	0.71	0.40	0.35	0.56	0.23	0.24	0.23	0.44
Wasserhaushalt	0.81	0.49	0.41	0.70	0.23	0.36	0.24	0.43
SPEI 1-Monat	0.86	0.51	0.41	0.74	0.26	0.33	0.25	0.47
Waldbrandwetterindex								
Angstrom	0.75	0.47	0.89	0.89	0.38	0.28	0.55	0.62
Baumgartner	0.92	0.47	0.63	0.81	0.27	0.31	0.32	0.43
Nesterov	0.79	0.35	0.82	0.89	0.21	0.11	0.57	0.57
FFMC	0.91	0.45	0.87	0.88	0.35	0.20	0.50	0.59
DMC	0.82	0.40	0.89	0.90	0.27	0.12	0.55	0.55
DC	0.56	0.36	0.91	0.72	0.23	0.17	0.50	0.44
ISI	0.84	0.50	0.89	0.94	0.22	0.21	0.55	0.66
BUI	0.78	0.40	0.92	0.89	0.27	0.13	0.55	0.53
FWI	0.90	0.44	0.93	0.93	0.25	0.17	0.56	0.57

Tab 1 R²-Koeffizienten aus den generalisierten linearen Modellen (GLM) für die Anzahl Brände und aus den linearen Regressionsmodellen für die Brandfläche, ermittelt jeweils mit einzelnen Meteoparametern, Trockenheits- oder Waldbrandwetterindizes für den Hochsommer (Juni, Juli und August) als erklärende Variable. Fett: R² > 0.80, rot: R² > 0.90. SPI: Standardized Precipitation Index, SPEI: Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index, Wasserhaushalt: Niederschlag – Evapotranspiration, Angstrom Index (Chandler et al 1983), Baumgartner Index (Baumgartner et al 1967), Nesterov Ignition Index (Nesterov 1949), FFMC: Fine Fuel Moisture Code, DMC: Duff Moisture Code, DC: Drought Code, ISI: Initial Spread Index, BUI: Buildup Index, FWI: Canadian Fire Weather Index (Van Wagner 1987).

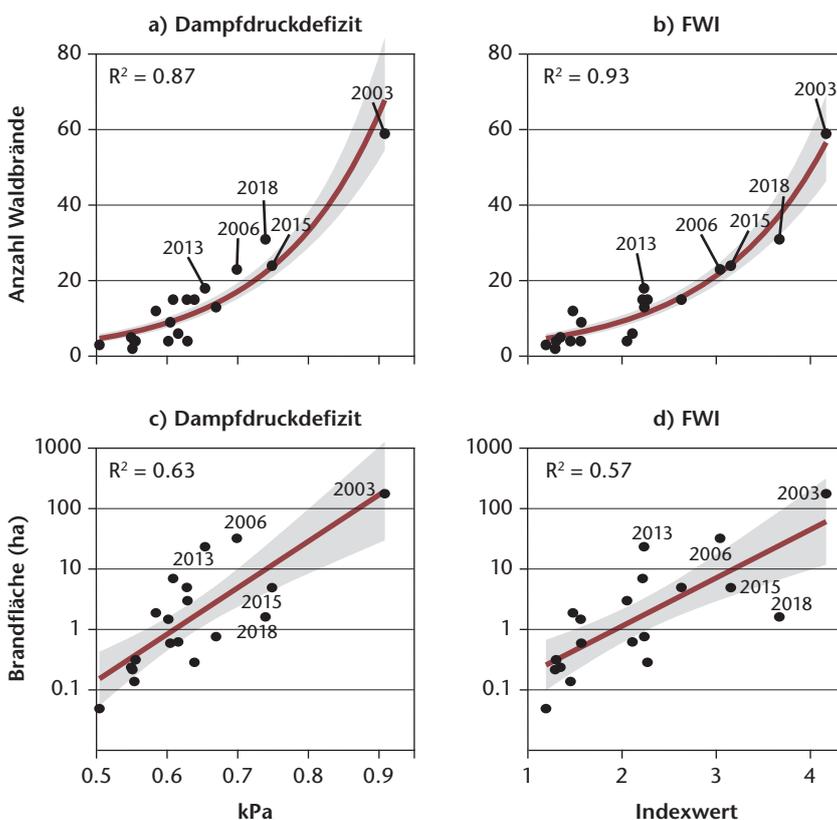


Abb 6 Beziehung zwischen dem mittleren Dampfdruckdefizit (a, c) bzw. dem mittleren FWI (Canadian Fire Weather Index; b, d) und der Anzahl Blitzschlagbrände (a, b) bzw. der durch Blitzschläge verursachten Brandfläche (logarithmiert, c, d) in den Jahren 2000 bis 2018 im Alpenraum (Nord-, Zentral- und Südalpen).

reliert. Die Anzahl Brände zeigt eine sehr starke Korrelation sowohl mit dem Dampfdruckdefizit ($R^2 = 0.87$; Abbildung 6a) als auch mit dem FWI ($R^2 = 0.93$; Abbildung 6b). Die Korrelation mit der Brandfläche ist etwas schwächer, aber auch hoch ($R^2 = 0.63$ und 0.57 , Abbildungen 6c und 6d). Alle vier Kurven steigen dabei exponentiell an (die Y-Achsen in den Abbildungen 6c und 6d sind logarithmiert) und zeigen, dass die Anzahl und vor allem die Fläche der Waldbrände umso stärker zunehmen, je trockener der Sommer ist. Der extreme Sommer 2003 hat eine grosse Hebelwirkung beim Verlauf der Kurven zur Anzahl der Brände.

Diskussion

Blitzschlagbrände entstehen fast ausschliesslich in gebirgigem Gelände (Abbildung 1). In der Schweiz entspricht dies vor allem steilen und kuppigen Gebieten der Süd- und der Zentralalpen, wo die blitzanziehenden und stark zur Austrocknung neigenden Nadelbäume dominieren (Conedera et al 2006). Wegen der lokalen thermo-orografischen Luftkonvektion treten in solchen Lagen häufig Hitzegewitter auf (Nisi 2019). In den Südalpen ist der Unterschied zwischen den gebirgigen, nadelholzreichen Hochlagegebieten des Sopraceneri und des

Misox und dem hügeligen, laubholzreichen Tieflandgebiet des Sottoceneri augenfällig. Obwohl sich die beiden Regionen in Bezug auf die Trockenheit kaum unterscheiden und Blitzschläge im Sottoceneri viel häufiger sind (Manoochehrnia et al 2007), ist die Anzahl der Blitzschlagbrände im Sopraceneri viel höher. Das Fehlen eines starken orografischen Gradienten könnte die geringe Anzahl Blitzschlagbrände im Mittelland und zum Teil auch im Jura erklären.

Aus der von Jahr zu Jahr stark schwankenden Zahl der Blitzschlagbrände wird ersichtlich, dass anhaltende Sommertrockenheit bei Weitem der wichtigste auslösende Faktor für solche Waldbrände ist. Wie für die borealen Wälder im Westen Nordamerikas (Sedano & Randerson 2014, Williams et al 2014) kann auch für die Schweizer Alpen mit einfachen dürrebezogenen Parametern wie dem Dampfdruckdefizit ein grosser Teil der jährlichen Variabilität im Blitzschlagbrandgeschehen erklärt werden. Bei zunehmender Trockenheit steigt die Anzahl und vor allem die Fläche von Blitzschlagbränden exponentiell an. Nur bei hoher oder extremer Sommertrockenheit ereignen sich Blitzschlagbrände auch im Jura und im Mittelland. Trockenperioden mit vielen Blitzschlagbränden sind für die Alpen nichts Neues: Solche gab es im letzten Jahrhundert zum Beispiel im Tessin in den Jahren 1976 und 1990 (Anzahl und Brandfläche) sowie 1991 (nur Anzahl Brände), in Graubünden in den Jahren 1983 (eher Brandfläche) und 1984 (Anzahl Brände) und im Wallis in den Jahren 1976 und 1993 (Anzahl Brände; Conedera et al 2006). Ob eher die Anzahl Brände (z.B. Hochsommer 2003, 2006, 2015 und 2018) oder die Brandfläche (2003, 2006, 2013) in die Höhe schnell, hängt wahrscheinlich vom Zeitpunkt sowie von der Dauer, der Ausprägung und der räumlichen Ausdehnung (z.B. alpenübergreifend) der Trockenheit ab. So war zum Beispiel auf der Alpensüdseite das Jahr 2003 in mehrfacher Hinsicht aussergewöhnlich (Waldbrandwetterindizes, Dampfdruckdefizit, Sommerhöchsttemperaturen, überdurchschnittlich viele und heftige Hitzegewitter), nicht aber das Jahr 2018. In Letzterem war der FWI in den Zentralalpen gar deutlich höher als in den Südalpen, was ausgesprochen selten der Fall ist. Auf jeden Fall tragen die Häufigkeit und die Ausprägung von Sommertrockenheit zur Erklärung des Süd-Nord-Gradienten in der Häufigkeit von Blitzschlagbränden in den Alpen bei.

Schlussbemerkungen

Aufgrund unserer Resultate darf man annehmen, dass die im Rahmen der Klimaveränderung prognostizierte Häufung von mit hohen Temperaturen gekoppelten Trockenperioden im Sommer die Gefahr von Blitzschlagbränden im Schweizer Alpen-

raum deutlich erhöht und dass auch der Jura und das Mittelland in solchen Perioden von Blitzschlagbränden betroffen sein können. Noch im Detail abzuklären sind die genauen meteorologischen Bedingungen, die die Auslösung und insbesondere die Ausbreitung von Blitzschlagbränden begünstigen. Ein vertieftes Verständnis von Blitzschlagbränden ist dringend nötig, da diese mehrheitlich in abgelegenen, steilen Gebieten auftreten und ein besonderes Feuerverhalten aufweisen (Latenzzeit, Bodenfeuer), was die Feuerwehr und den Forstdienst bei ihrer Bekämpfung vor besondere Herausforderungen stellt. ■

Eingereicht: 6. Dezember 2019, akzeptiert (mit Review): 28. April 2020

Literatur

- ANDERSON K (2002) A model to predict lightning-caused fire occurrences. *Int J Wildland Fire* 11: 163–172.
- BAUMGARTNER A, KLEMMER L, RASCHKE E, WALDMANN G (1967) Waldbrände in Bayern 1950 bis 1959. *Mitt Staatsforstverwalt Bayerns* 36: 57–79.
- CESTI G, CONEDERA M, SPINEDI F (2005) Considerazioni sugli incendi boschivi causati da fulmini. *Schweiz Z Forstwes* 156: 353–361. doi: 10.3188/szf.2005.0353
- CHANDLER C, CHENEY P, THOMAS P, TRABAUD L, WILLIAMS D (1983) *Fire in forestry*. New York: Wiley. 450 p.
- CONEDERA M, CESTI G, PEZZATTI GB, ZUMBRUNNEN T, SPINEDI F (2006) Lightning-induced fires in the Alpine region: an increasing problem. In: Viegas DX, editor. *Figueira da Foz*. Coimbra: Univ Coimbra. 9 p.
- DE ANGELIS A, RICOTTA C, CONEDERA M, PEZZATTI GB (2015) Modelling the meteorological forest fire niche in heterogeneous pyrologic conditions. *PLoS ONE* 10: e0116875.
- FLANNIGAN MD, VAN WAGNER CE (1991) Climate change and wildfires in Canada. *Can J For Res* 21: 66–72.
- GANTEAUME A, CAMIA A, JAPPIOT M, SAN-MIGUEL-AYANZ J, LONG-FOURNEL M ET AL (2013) A review of the main driving factors of forest fire ignition over Europe. *Environ Manage* 51: 651–662.
- GONSETH Y, WOHLGEMUTH T, SANSONNES B, BUTTLER A (2001) Die biogeographischen Regionen der Schweiz. Erläuterungen und Einteilungsstandard. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft, Umwelt-Materialien 137. 48 p.
- GRANSTRÖM A (1993) Spatial and temporal variation in lightning ignitions in Sweden. *J Veg Sci* 4: 737–744.
- LARJAVAARA M, KUULUVAINEN T, RITA H (2005) Spatial distribution of lightning-ignited forest fires in Finland. *For Ecol Manage* 208: 177–188.
- MANOOCHHRNIA P, RACHIDI F, RUBINSTEIN M, SCHULZ W (2007) Lightning statistics in Switzerland. In: IX Int Symp Lightning Protection, 26th–30th November 2007, Foz do Iguaçu, Brazil. 9 p. www.aldis.at/fileadmin/user_upload/aldis/publication/2007/1_SIPDA2007_Manoochehrnia.pdf (24.4.2020)
- MARTÍNEZ J, VEGA-GARCIA C, CHUVIECO E (2009) Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain. *J Environ Manage* 90: 1241–1252.
- MÜLLER MM, VACIK H (2017) Characteristics of lightnings igniting forest fires in Austria. *Agric For Meteorol* 240–241: 26–34.
- MÜLLER MM, VACIK H, DIENDORFER G, ARPACI A, FORMAYER H ET AL (2013) Analysis of lightning-induced forest fires in Austria. *Theor Appl Climatol* 111: 183–193.
- NESTEROV VG (1949) Combustibility of the forest and methods for its determination. Moscow: Goslesbumizdat. 76 p. (in Russian)

- NISI L (2019) Spatial and temporal distribution of hailstorms in the Alpine region. A long term, high resolution, radar-based analysis. Bern: Univ Bern, PhD Thesis. 141 p.
- PEZZATTI GB, BERTOGLIATI M, GACHE S, REINHARD M, CONEDERA M (2019) Swissfire: technisch modernisiert und dank Archivrecherchen inhaltlich erweitert. Schweiz Z Forstwes 170: 234–241. doi: 10.3188/szf.2019.0234
- PYNE SJ, ANDREWS PL, LAVEN RD (1996) Introduction to wildland fire. New York: Wiley. 769 p.
- REINEKING B, WEIBEL P, CONEDERA M, BUGMANN H (2010) Environmental determinants of lightning- v. human-induced forest fire ignitions differ in a temperate mountain region of Switzerland. Int J Wildland Fire 19: 541–557.
- SCHULZ W, DIENDORFER G, PEDEBOY S, POELMAN DR (2016) The European lightning location system EUCLID – Part 1: Performance analysis and validation. Nat Hazards Earth Syst Sci 16: 595–605.
- SCOTT AC, BOWMAN DMJS, BOND WJ, PYNE SJ, ALEXANDER ME (2014) Fire on Earth: an introduction. New Jersey: Wiley. 434 p.
- SEDANO F, RANDERSON JT (2014) Multi-scale influence of vapor pressure deficit on fire ignition and spread in boreal forest ecosystems. Biogeosciences 11: 3739–3755.
- STOCKS BJ, MASON JA, TODD JB, BOSCH EM, WOTTON BM, ET AL (2002) Large forest fires in Canada, 1959–1997. J Geophys Res 108: 8149.
- THORNTHWAITE CW (1948) An approach toward a rational classification of climate. Geogr Rev 38: 55–94.
- VACCHIANO G, FODERI C, BERRETTI R, MARCHI E, MOTTA R (2018) Modeling anthropogenic and natural fire ignitions in an inner-alpine valley. Nat Hazards Earth Syst Sci 18: 935–948.
- VAN WAGNER CE (1987) Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Ottawa: Canadian Forestry Service, Forestry Technical Report 35. 35 p.
- VÁZQUEZ A, MORENO JM (1998) Patterns of lightning-, and people-caused fires in peninsular Spain. Int J Wildland Fire 8: 103–115.
- VERAVERBEKE S, ROGERS BM, GOULDEN ML, JANDT RR, MILLER CE ET AL (2017) Lightning as a major driver of recent large fire years in North American boreal forests. Nat Clim Change 7: 529–534.
- VICENTE-SERRANO SM, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO JI (2010) A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index SPEI. J Clim 23: 1696–1718.
- WILLIAMS AP, SEAGER R, MACALADY AK, BERKELHAMMER M, CRIMMINS MA ET AL (2014) Correlations between components of the water balance and burned area reveal new insights for predicting forest fire area in the southwest United States. Int J Wildland Fire 24: 14–26.
- WOTTON BM, MARTELL DL (2005) A lightning fire occurrence model for Ontario. Can J For Res 35: 1389–1401.
- ZHANG D (2017) A coefficient of determination for generalized linear models. Am Stat 71: 310–316.

Incendies causées par la foudre et sécheresse estivale: existe-t-il une relation?

La foudre est la principale cause naturelle d'incendie de forêt dans le monde. En Suisse, la foudre est responsable en moyenne d'un tiers environ (30.5%) des incendies de forêts survenant pendant les mois d'été (juin, juillet et août). Dans cet article, nous analysons la répartition géographique et les conditions météorologiques existantes au moment de la survenue des 275 feux de foudre enregistrés dans la base de données Swissfire pour la période 2000–2018. Les incendies dus à la foudre se produisent presque exclusivement dans les régions montagneuses, en particulier dans les Alpes, avec une fréquence clairement décroissante sur un gradient sud-nord. Les espèces les plus touchées sont les résineux, en particulier l'épicéa et le mélèze. La sécheresse estivale persistante est de loin le facteur déclenchant le plus important des feux de foudre, avec un effet d'augmentation exponentielle de la fréquence des événements et de la surface brûlée en particulier avec une sévérité croissante des conditions de sécheresse. Nos résultats montrent clairement que l'intensification prévue dans le contexte du changement climatique de périodes chaudes et de sécheresse estivale prolongée peut augmenter considérablement le danger de feux de foudre dans les Alpes suisses et élargir le danger dans le Jura et sur le Plateau. Les conditions météorologiques qui favorisent les feux de foudre doivent encore être clarifiées en détail.

Lightning fires and summer drought: is there a relationship?

Lightning strikes are the most important natural cause of forest fires worldwide. On average, lightning fires in Switzerland account for around one third (30.5%) of the events occurring in the high summer months (June, July and August). In this paper, we analyse the distribution and the prevailing meteorological conditions at time of occurrence of the 275 lightning fires registered in the Swissfire database for the period 2000–2018. Lightning fires occur in Switzerland almost exclusively in mountainous areas, especially in the Alps, although with a clear south-north decreasing gradient. The most affected species are conifers, especially spruce and larch. Persistent summer dryness is by far the main triggering factor for lightning fires, which even show an exponential increase in fire frequency and the related burnt area in particular with increasing drought severity. Our results clearly show that the predicted intensification of warm and prolonged summer dry periods in the context of climate change increases the probability of lightning fires in the Swiss Alps and extends the phenomenon to the Jura and Plateau. However, the exact meteorological conditions that favour lightning fires still need to be clarified in detail.